

**Utilisation d'images satellitaires pour évaluer la
superficie, l'étendue et la densité de l'herbier de la
zostère marine (*Zostera marina*) de la péninsule
de Manicouagan (Québec)**

L. Provencher et S. Deslandes¹

Direction régionale des sciences
Pêches et Océans Canada
Institut Maurice-Lamontagne
850, route de la Mer
Mont-Joli (Québec) G5H 3Z4

2012

**Rapport technique canadien des sciences
halieutiques et aquatiques 2988**

¹Sherbrooke (Québec) J1G 1G4

Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques

Les rapports techniques contiennent des renseignements scientifiques et techniques qui constituent une contribution aux connaissances actuelles, mais qui ne sont pas normalement appropriés pour la publication dans un journal scientifique. Les rapports techniques sont destinés essentiellement à un public international et ils sont distribués à cet échelon. Il n'y a aucune restriction quant au sujet; de fait, la série reflète la vaste gamme des intérêts et des politiques de Pêches et Océans Canada, c'est-à-dire les sciences halieutiques et aquatiques.

Les rapports techniques peuvent être cités comme des publications à part entière. Le titre exact figure au-dessus du résumé de chaque rapport. Les rapports techniques sont résumés dans la base de données *Résumés des sciences aquatiques et halieutiques*.

Les rapports techniques sont produits à l'échelon régional, mais numérotés à l'échelon national. Les demandes de rapports seront satisfaites par l'établissement auteur dont le nom figure sur la couverture et la page du titre.

Les numéros 1 à 456 de cette série ont été publiés à titre de Rapports techniques de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada. Les numéros 457 à 714 sont parus à titre de Rapports techniques de la Direction générale de la recherche et du développement, Service des pêches et de la mer, ministère de l'Environnement. Les numéros 715 à 924 ont été publiés à titre de Rapports techniques du Service des pêches et de la mer, ministère des Pêches et de l'Environnement. Le nom actuel de la série a été établi lors de la parution du numéro 925.

Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences

Technical reports contain scientific and technical information that contributes to existing knowledge but which is not normally appropriate for primary literature. Technical reports are directed primarily toward a worldwide audience and have an international distribution. No restriction is placed on subject matter and the series reflects the broad interests and policies of Fisheries and Oceans Canada, namely, fisheries and aquatic sciences.

Technical reports may be cited as full publications. The correct citation appears above the abstract of each report. Each report is abstracted in the data base *Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts*.

Technical reports are produced regionally but are numbered nationally. Requests for individual reports will be filled by the issuing establishment listed on the front cover and title page.

Numbers 1-456 in this series were issued as Technical Reports of the Fisheries Research Board of Canada. Numbers 457-714 were issued as Department of the Environment, Fisheries and Marine Service, Research and Development Directorate Technical Reports. Numbers 715-924 were issued as Department of Fisheries and Environment, Fisheries and Marine Service Technical Reports. The current series name was changed with report number 925.

Rapport technique canadien
des sciences halieutiques et aquatiques 2988

2012

**Utilisation d'images satellitaires pour évaluer la superficie, l'étendue et la densité de
l'herbier de la zostère marine (*Zostera marina*) de la péninsule de Manicouagan
(Québec)**

par

L. Provencher¹ et S. Deslandes²

¹Direction régionale des Sciences
Pêches et Océans Canada
Institut Maurice-Lamontagne
850, route de la Mer
Mont-Joli (Québec)
G5H 3Z4

²501, de Lafontaine, Sherbrooke, Québec, J1G 1G4

© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada, 2012.
N° de cat. Fs 97-6/2988F ISSN 1488-545X

On doit citer la publication comme suit :

Provencher, L. et Deslandes, S. 2012. Utilisation d'images satellitaires pour évaluer la superficie, l'étendue et la densité de l'herbier de la zostère marine (*Zostera marina*) de la péninsule de Manicouagan (Québec). Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 2988: vi + 16 pp.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|------------|
| TABLE DE MATIÈRES..... | iii |
| LISTE DES TABLEAUX..... | iv |
| LISTE DES FIGURES..... | iv |
| RÉSUMÉ..... | v |
| ABSTRACT..... | v |
| 1. INTRODUCTION..... | 1 |
| 2. SITE D'ÉTUDE..... | 2 |
| 3. MÉTHODOLOGIE..... | 3 |
| 3.1 IMAGES UTILISÉES..... | 3 |
| 3.2 DONNÉES TERRAIN..... | 3 |
| 3.3 APPROCHE DE SEGMENTATION ET DE CLASSIFICATION..... | 4 |
| 4. RÉSULTATS..... | 6 |
| 4.1 SUPERFICIE ET ÉTENDUE DE L'HERBIER..... | 6 |
| 4.2 CLASSIFICATION DES IMAGES..... | 6 |
| 4.3 VALIDATION DES CLASSES DE DENSITÉ | 11 |
| 5. DISCUSSION..... | 13 |
| 6. CONCLUSION..... | 14 |
| 7. REMERCIEMENTS..... | 15 |
| 8. RÉFÉRENCES..... | 15 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau 1. Description des images satellitaires IKONOS et ASTER..... | 3 |
| Tableau 2. Comparaison entre les classes de densité de la zostère marine issue de la classification des images IKONOS 2004 et ASTER 2002 pour les trois secteurs de la péninsule de Manicouagan..... | 7 |
| Tableau 3. Précision globale de la classification de la densité de la zostère marine produite à l'aide des images IKONOS..... | 11 |
| Tableau 4. Précision globale de la classification de la densité de la zostère marine produite à l'aide de l'image Aster..... | 12 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1. Localisation de l'herbier de la péninsule de Manicouagan..... | 2 |
| Figure 2. Carte de la densité de la zostère marine pour le secteur de Pointe-aux-Outardes produite à partir des images IKONOS et ASTER | 8 |
| Figure 3. Carte de la densité de la zostère marine pour le secteur de la baie St-Ludger produite à partir des images IKONOS et ASTER..... | 9 |
| Figure 4. Carte de la densité de la zostère marine pour le secteur de la pointe Manicouagan produite à partir des images IKONOS et ASTER..... | 10 |

RÉSUMÉ

Provencher, L. et Deslandes, S. 2012. Utilisation des images satellitaires pour évaluer la superficie, l'étendue et la densité de l'herbier de la zostère marine (*Zostera marina*) de la péninsule de Manicouagan (Québec). Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 2988: vi + 16 pp.

Les résultats obtenus avec deux types d'images ASTER et IKONOS démontrent l'utilité des images satellitaires comme outils pour effectuer la cartographie et le suivi de l'herbier monospécifique de la zostère marine de la péninsule de Manicouagan. L'utilisation de l'imagerie satellitaire s'avère une solution efficace, rentable et demande peu d'effort, comparativement à un suivi terrain. La cartographie de l'étendue de la zostère de l'herbier de Manicouagan s'est avérée très précise pour IKONOS et pour ASTER, de l'ordre de 95,6% et 90,6% respectivement, en comparant la classification avec les données de validation terrain. Deux classes de densité de zostères, soit les classes dense et éparses, ont été cartographiées à partir des images ASTER et IKONOS. La résolution spatiale des données IKONOS de 4 mètres favorise la cartographie de la densité de la zostère pour les secteurs hétérogènes. Le mode d'étalement de la zostère sous forme d'îlots denses en mosaïque est bien visible sur la cartographie produite par IKONOS tandis que sur les images ASTER, de plus faible résolution, les îlots se fondent aux zones de zostères éparées ou sans zostère. La résolution spatiale des images ASTER est cependant suffisamment précise pour la classification des secteurs denses et continus de l'herbier.

ABSTRACT

Provencher, L. et Deslandes, S. 2012. Utilisation des images satellitaires pour évaluer la superficie, l'étendue et la densité de l'herbier de la zostère marine (*Zostera marina*) de la péninsule de Manicouagan (Québec). Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 2988: vi + 16 pp.

The results obtained with two image types, ASTER and IKONOS, demonstrate the utility of satellite imagery as a tool to map and monitor monospecific eelgrass beds of the Manicouagan Peninsula. The use of satellite imagery is efficient and cost effective and requires little effort compared to field monitoring. Mapping the extent of eelgrass in the Manicouagan has proven very accurate for IKONOS and ASTER (95.6% and 90.6% respectively), when comparing the classification with field validated data. Two classes of eelgrass density (dense, sparse) were mapped from ASTER and IKONOS images. The 4-meter spatial resolution of IKONOS data was well adapted for mapping eelgrass density in heterogeneous sectors. Areas into which eelgrass was expanding, which are characterized by mosaics of dense and sparse patches of vegetation, were clearly visible on maps produced using IKONOS images whereas classifications based on ASTER images, which are of lower resolution, showed patches to be either areas of sparse or no eelgrass cover. The spatial resolution of ASTER images, however, was sufficient to classify dense and continuous eelgrass sectors.

1. INTRODUCTION

En 1998, le secteur marin entourant la péninsule de Manicouagan, située sur la rive nord de l'estuaire maritime du Saint-Laurent, a été proposé par le ministère des Pêches et des Océans du Canada comme site pour l'établissement d'une zone de protection marine (ZPM) au Québec (Canada). Parmi les habitats importants à protéger dans cette ZPM, l'herbier de *Zostera marina* (L.), qui colonise les battures de la péninsule de Manicouagan, a été ciblé. Les herbiers de zostères sont reconnus comme étant des milieux de haute productivité primaire et offrant un habitat vital pour plusieurs groupes d'espèces en zone côtière (Duarte et Chiscano 1999, Hily et Bouteille 1999, Hemminga et Duarte 2000). Étant situés en zone côtière en eaux peu profondes, les herbiers sont affectés par les nombreuses activités humaines qui s'y déroulent dont la pêche et l'aquaculture, l'écoulement d'eaux usées domestiques et industrielles, les barrages hydroélectriques, les modifications physiques du milieu, les floraisons d'algues et le réchauffement climatique (Orth et coll. 2006). Plusieurs de ces pressions, ou leur combinaison ont mené à des pertes importantes d'herbiers partout dans le monde (Orth et coll. 2006). Aussi, développer des outils pour cartographier ces herbiers, de façon à pouvoir suivre leur progression spatiale dans le temps devient une priorité pour les scientifiques et gestionnaires de la zone côtière. En 2004 et 2005, une étude a donc été entreprise afin d'évaluer l'utilisation de l'imagerie satellitaire comme outil pouvant répondre à ce besoin pour les herbiers de la péninsule de Manicouagan.

La taille, la configuration et la densité du couvert végétal d'un herbier sont parmi les paramètres essentiels nous permettant de détecter la régression ou la progression de la zostère et d'apprendre à différencier les changements liés aux perturbations anthropiques des changements d'ordre naturel (Schweizer, 2005). Le suivi de ces paramètres exige l'utilisation d'une technologie permettant la prise périodique de données sur de vastes superficies tout en réduisant les coûts et le temps nécessaire à leur acquisition. À plusieurs endroits dans le monde, on utilise des données d'observation de la Terre pour produire les cartes de base et faire le suivi spatio-temporel de végétation submergée (Schweizer et coll., 2005; Gullström et coll., 2006; Dekker et coll. 2005; Pasquali et coll. 2005; Lundén et Gullström, 2003; Andréfouët et coll., 2004; Wallace et coll., 2006). La cartographie de ces milieux à l'aide de ces données représente un réel avantage grâce à la répétitivité des passages des satellites. Plusieurs satellites de résolutions différentes ont été utilisés, dont LANDSAT, SPOT, ASTER et IKONOS, pour cartographier la zostère marine (Stritholt et Frost, 1996; Fornes et coll., 2006; Lundén et coll., 2003; Schweizer et coll., 2005; Pasquali et coll., 2005). Les meilleurs résultats ont été obtenus dans les zones de zostères denses, en eau peu profonde et claire (peu de turbidité) et sur un substrat de sable clair. Ces caractéristiques correspondent à l'herbier de la péninsule de Manicouagan.

Cette étude présente une évaluation de l'utilisation de deux types d'images de résolution différente, soit IKONOS (pixel de 4m) et ASTER (pixel de 15m) pour déterminer la superficie et cartographier l'étendue et la densité de la zostère marine de l'herbier de la péninsule de Manicouagan. Les résultats obtenus avec ces images sont comparés.

2. SITE D'ÉTUDE

L'étude a été menée sur un des plus vastes herbiers de la zostère marine (*Zostera marina* L.) de l'estuaire du St-Laurent (Québec, Canada), celui de la péninsule de Manicouagan. Il est situé ($49^{\circ}08'N$, $68^{\circ}31'W$) sur la rive nord de l'estuaire maritime du Saint-Laurent entre l'embouchure de la rivière aux Outardes et la rivière Manicouagan (Figure 1). La péninsule est soumise à un régime de marée semi-diurne dont l'amplitude moyenne (pleine mer supérieure de marée moyenne) atteint une élévation de 3,0 m. L'herbier s'étend autour du zéro marégraphique où les perturbations physiques (vagues, courant, dessiccation, couvert de glace hivernale) sont plus sévères. Il se découvre complètement lors des grandes marées mensuelles de vives-eaux. Il est monospécifique et le développement de son couvert végétal est limité par la présence des glaces en hiver qui, en plus de détruire annuellement le système foliaire, arrachent des parcelles de racines et rhizomes créant des îlots de zostères et des marelles sableuses dans l'herbier. L'herbier se répartit en 3 grandes aires distinctes, plus ou moins reliées, dans les secteurs de Pointe-aux-Outardes (PAO), de la baie St-Ludger (BSL) et de la pointe Manicouagan (PM) (Figure 1).

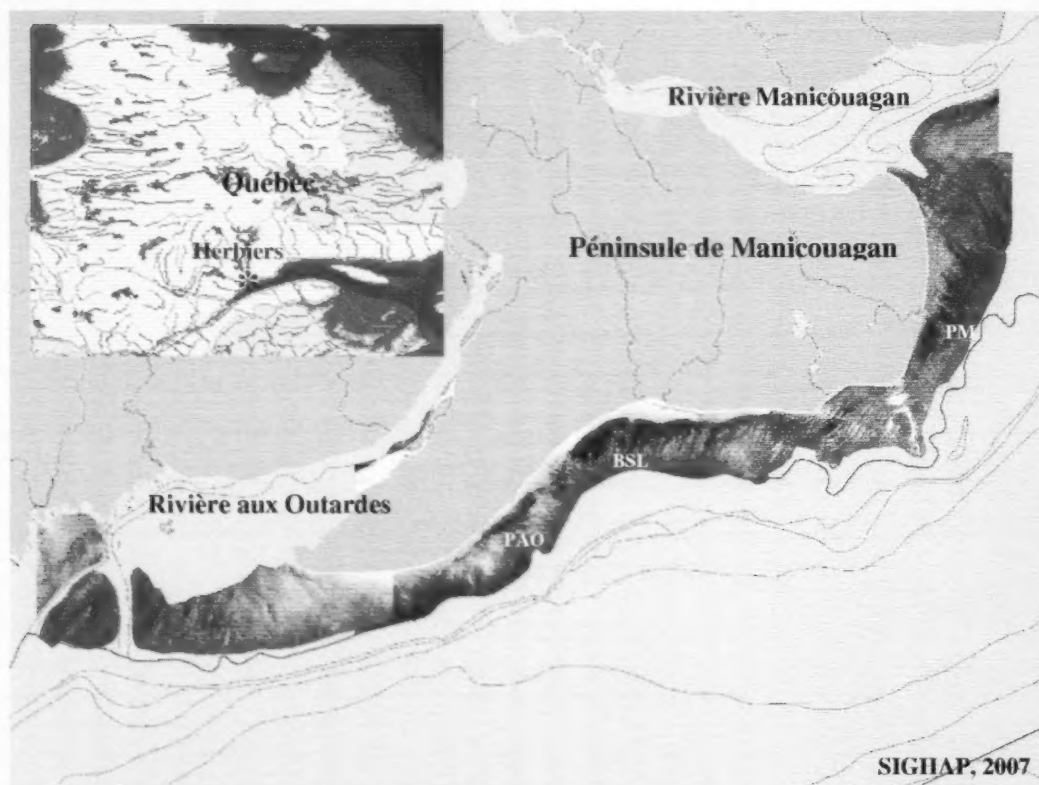


Figure 1. Localisation de l'herbier de la péninsule de Manicouagan. La ligne rouge représente le zéro marégraphique. PAO = Pointe-aux-Outardes, BSL = Baie St-Ludger, PM = Pointe Manicouagan. Images satellitaires IKONOS, août 2004.

3. MÉTHODOLOGIE

3.1 IMAGES UTILISÉES

Deux types d'images de résolution différente, soit IKONOS et ASTER, ont été utilisés. IKONOS est un satellite américain, lancé en septembre 1999 par la compagnie GeoEye (www.geoeye.com) qui fait l'acquisition d'images à une résolution spatiale de 4 m pour quatre bandes spectrales (Tableau 1). Le capteur ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), installé à bord du Satellite Terra, a été mis en orbite en décembre 1999 par la NASA. ASTER est muni d'un capteur VNIR qui fait l'acquisition d'images à une résolution spatiale de 15 m pour trois bandes spectrales (Tableau 1).

La sélection d'images IKONOS a été réalisée en tenant compte de la table des marées prédites au cours de la période optimale: août et septembre. Ainsi, les images obtenues ont été synchronisées avec les marées les plus basses de manière à réduire l'effet de la profondeur de l'eau au-dessus de la zostère et à coordonner les travaux terrain qui requièrent également une marée très basse. Ainsi, le 4 août 2004, une image IKONOS a été acquise simultanément aux collectes de données terrain lors de la marée basse de 0,4 mètre. La couverture de la péninsule a été complétée le 9 septembre 2004 par trois images, acquises lors de la marée moyenne (2 m). L'image ASTER utilisée pour cette étude est une image d'archives du 9 août 2002. Les données vectorielles au 1:20 000 de la base de données topographiques du Québec (BDTQ) ont servi à réaliser l'orthorectification des images.

Tableau 1. Description des images satellitaires IKONOS et ASTER

| Satellite | Bande | Bandes spectrales (µm) | Largeur (km) | Résolution (m) | Date d'acquisition |
|-----------|-----------------------|------------------------|--------------|----------------|----------------------------|
| IKONOS | 1 - Bleue | 0.445 - 0.516 | 11 | 4 | 4 août 2004 9 sept 2004 |
| | 2 - Verte | 0.506 - 0.595 | | | |
| | 3 - Rouge | 0.632 - 0.698 | | | |
| | 4 - Proche infrarouge | 0.757 - 0.853 | | | |
| ASTER | 1 - Verte | 0.52 - 0.60 | 60 | 15 | 9 août 2002 |
| | 2 - Rouge | 0.63 - 0.69 | | | |
| | 3 - Proche infrarouge | 0.76 - 0.86 | | | |

3.2 DONNÉES TERRAIN

Une campagne de terrain a été menée les 4 et 5 août 2004 pour déterminer la délimitation géographique des zones de la zostère marine et estimer les classes de densité sur des stations préalablement identifiées sur l'image ASTER d'archives. À ce jeu de données,

s'est ajouté diverses observations géoréférencées récoltées à l'été 2004 sur le terrain: photographies numériques, contour de l'herbier, inventaire à des stations d'échantillonnage d'autres études de l'herbier (voir Grant et Provencher 2007).

Validation de l'étendue de la zostère

À partir de l'ensemble de ces observations de terrain (au total 341), un jeu de données sur la présence/absence de zostères a été préparé pour évaluer la précision de la carte de l'étendue de la zostère obtenue avec les images satellitaires.

Validation de la classification de la densité

À partir de la campagne de terrain menée en août 2004 et d'interprétation des photographies numériques géoréférencées, on a pu constituer un jeu de données de 101 stations où la densité a été estimée. Ces données ont servi à guider la classification de la densité de la zostère sur les images satellitaires.

Cette classification de la densité de la zostère a été validée par de nouvelles données récoltées en 2005 lors d'une campagne d'échantillonnage effectuée sur 9 sites répartis en raison de 3 sites par secteur (PAO, BSL et PM) (Figure 1). Ces trois sites ont été positionnés sur une ligne perpendiculaire à l'herbier: un site en bordure côté rive, un site au centre et l'autre en bordure côté mer, de manière à représenter différents types de densité de zostères dans l'herbier (voir les figures 2, 3 et 4 dans la section 'Résultats'). Chacun de ces sites ont fait l'objet d'une évaluation quantitative de la densité de la zostère sur une zone de 32 x 48 mètres découpée selon un quadrillage de 96 quadrats de 4 m x 4 m.

3.3 APPROCHE DE SEGMENTATION ET DE CLASSIFICATION

La cartographie de la zostère marine a été réalisée sur une superficie de 425 km² dans la zone intertidale de la péninsule de Manicouagan, en utilisant les bandes visibles des images IKONOS et ASTER dans un processus de segmentation et de classification orientée-objets (eCognition). Les bandes visibles ont été identifiées comme étant celles qui permettent de mieux définir la végétation submergée. Ainsi, la classification a porté sur les bandes rouges et vertes des images optiques.

La segmentation sur les images IKONOS et ASTER a porté sur la zone intertidale seulement, les zones terrestres ayant été masquées. Cette dernière a été délimitée en utilisant les données bathymétriques provenant du Service hydrographique du Canada. Un rehaussement des valeurs numériques en zone intertidale a permis de faire ressortir les détails de l'image parmi une dynamique de niveaux de gris généralement faible. Un rehaussement du second degré (fonction « square root ») est la technique d'amélioration du contraste qui s'est avérée la plus performante pour la zone intertidale. Elle a été appliquée sur les quatre images IKONOS. Une méthodologie similaire a été utilisée pour évaluer le potentiel de cartographie de la zostère marine à partir des images ASTER.

Par la suite, une segmentation en objets a été réalisée sur les images IKONOS et ASTER pour extraire grossièrement les zones de la zostère marine, puis une seconde

segmentation a permis de raffiner le contour de la zostère et d'identifier des classes de densité. La segmentation d'une image est un processus de regroupement de pixels similaires déterminé par un critère d'homogénéité. Cette approche permet de délimiter des régions homogènes, appelées objets, dont la dimension est déterminée par un facteur d'échelle. Deux segmentations ont été produites sur chaque image pour extraire la zostère marine.

La méthode de segmentation employée est la méthode du plus proche voisin, qui permet de sélectionner et d'assigner des objets de sites connus aux classes prédéterminées de densité. Les valeurs moyennes pour les bandes vertes et rouges de tous les polygones de zostères ont été comparées aux moyennes des classes de densité selon les données de référence. Le classificateur assigne une classe résultante aux objets d'après leur similitude avec les valeurs moyennes des sites de références. La base de données terrain a été importée dans Definiens Professionnal v5.0 de sorte que la sélection des sites de référence pour l'entraînement de la classification s'est faite de manière semi-automatisée. Les zones de substrat (sable) sans zostère ont été regroupées en une classe: absence de zostère, tandis que les zones avec zostères ont été déterminées comme suit: zostères denses ($> 50\%$), zostères éparses (10 à 50%), trace de zostères ou zostères très morcelées ($< 10\%$). La classification finale a été transférée au logiciel ArcMAP 9.0 afin d'y effectuer une opération de lissage des vecteurs à l'aide d'une fonction polynomiale. Une simplification cartographique ayant pour objectif de ne retenir que les polygones de plus de 16 m^2 pour IKONOS et de 225 m^2 pour ASTER, soit l'équivalent de la superficie couverte par 1 pixel, a également été appliquée. La carte de l'étendue de la zostère marine a été produite en combinant les trois classes de densité.

4. RÉSULTATS

4.1 SUPERFICIE ET ÉTENDUE DE L'HERBIER

L'image IKONOS présentée à la figure 1 permet de visualiser le patron que forme la zostère autour de la péninsule Manicouagan. L'herbier s'allonge parallèle à la rive tandis que vers le large, perpendiculaires à la rive, des bandes de zostères alternent avec des bandes de sable.

L'évaluation de la précision des cartes a été réalisée à partir d'un échantillon de 341 données terrain indiquant la présence/absence de zostères. Les résultats de l'évaluation de la précision indiquent que 95,6% des sites se sont bien classés sur les images IKONOS et 90,6% sur les images ASTER. La superficie totale de la zostère marine est de 1264 ha évaluée à partir de l'image Aster 2002 et de 1456 ha évaluée à l'aide des données IKONOS 2004.

4.2 CLASSIFICATION DES IMAGES

Trois classes de densité de zostères (traces, éparses et denses) ont été délimitées par la classification employée pour les 3 secteurs de l'herbier sur les images IKONOS 2004 et ASTER 2002 (Figures 2, 3 et 4). Sur les deux images, les classes éparses et denses occupent chacune près de la moitié de la superficie de l'herbier (Tableau 2). La zostère est dense au centre de l'herbier et éparses sur son pourtour, particulièrement vers le large.

Là où la zostère est dense et continue, c'est-à-dire au centre de l'herbier, les deux images IKONOS et ASTER correspondent bien. Elles sont cependant plus étendues vers le large sur l'image IKONOS et ce, particulièrement pour le secteur BSL (Figures 2, 3 et 4). Les zones éparses du pourtour de l'herbier sont interprétées différemment par les deux capteurs. Avec ASTER ces zones sont en général homogènes, tandis que sur l'image IKONOS elles sont parsemées d'îlots denses formant une mosaïque. Ceci est particulièrement frappant pour le secteur PM (Figure 4). Pour le secteur BSL, les polygones indiquant des traces de zostères sur l'image ASTER se retrouvent en zones de zostères éparses sur l'image IKONOS (Figure 3).

Tableau 2. Comparaison entre les classes de densité de la zostère marine issues de la classification des images IKONOS 2004 et ASTER 2002 pour les trois secteurs de la péninsule de Manicouagan.

| Secteur : PAO | Satellite : IKONOS | Satellite : ASTER |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Classe | Superficie (ha) | Superficie (ha) |
| Dense | 59.0 | 45.3 |
| Éparse | 67.0 | 56.2 |
| Trace | 2.7 | 0.0 |
| TOTAL : | 127.7 | 101.5 |

| Secteur : PM | Satellite : IKONOS | Satellite : ASTER |
|---------------------|---------------------------|--------------------------|
| Classe | Superficie (ha) | Superficie (ha) |
| Dense | 177.4 | 145.4 |
| Éparse | 266.0 | 278.5 |
| Trace | 1 | 12.7 |
| TOTAL : | 444.4 | 436.6 |

| Secteur : BSL | Satellite : IKONOS | Satellite : ASTER |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Classe | Superficie (ha) | Superficie (ha) |
| Dense | 297.6 | 248.8 |
| Éparse | 344.1 | 231.5 |
| Trace | 33.5 | 121 |
| TOTAL : | 675.2 | 601.3 |

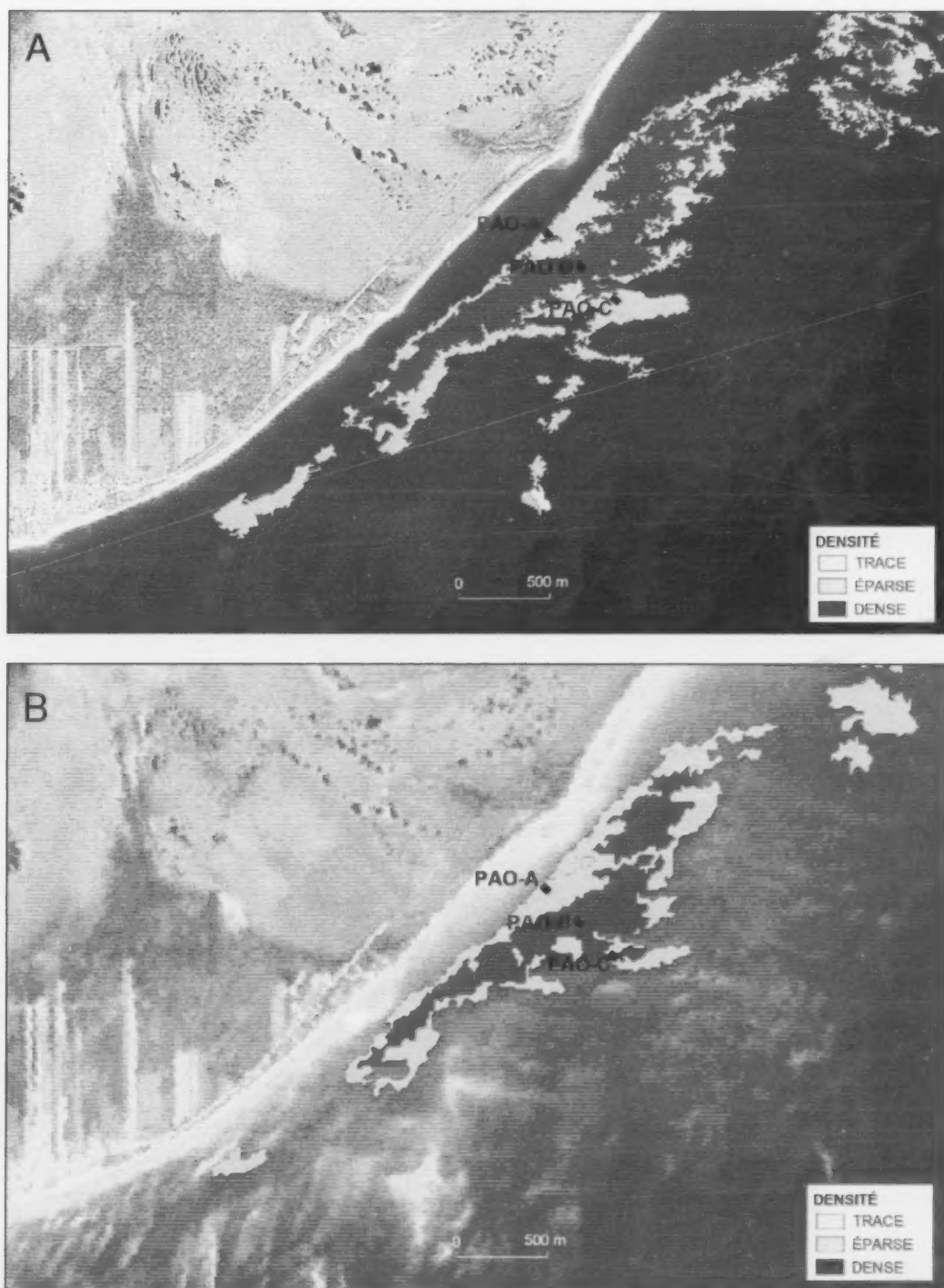


Figure 2. Carte de la densité de la zostère marine pour le secteur de Pointe-aux-Outardes (PAO) produite à partir des images IKONOS (A) et ASTER (B). PAO-A, PAO-B et PAO-C correspondent aux sites échantillonnés en 2005.



Figure 3. Carte de la densité de la zostère marine pour le secteur de la baie St-Ludger (BSL) produite à partir des images IKONOS (A) et ASTER (B). BSL-A, BSL-B et BSL-C correspondent aux sites échantillonnés en 2005.

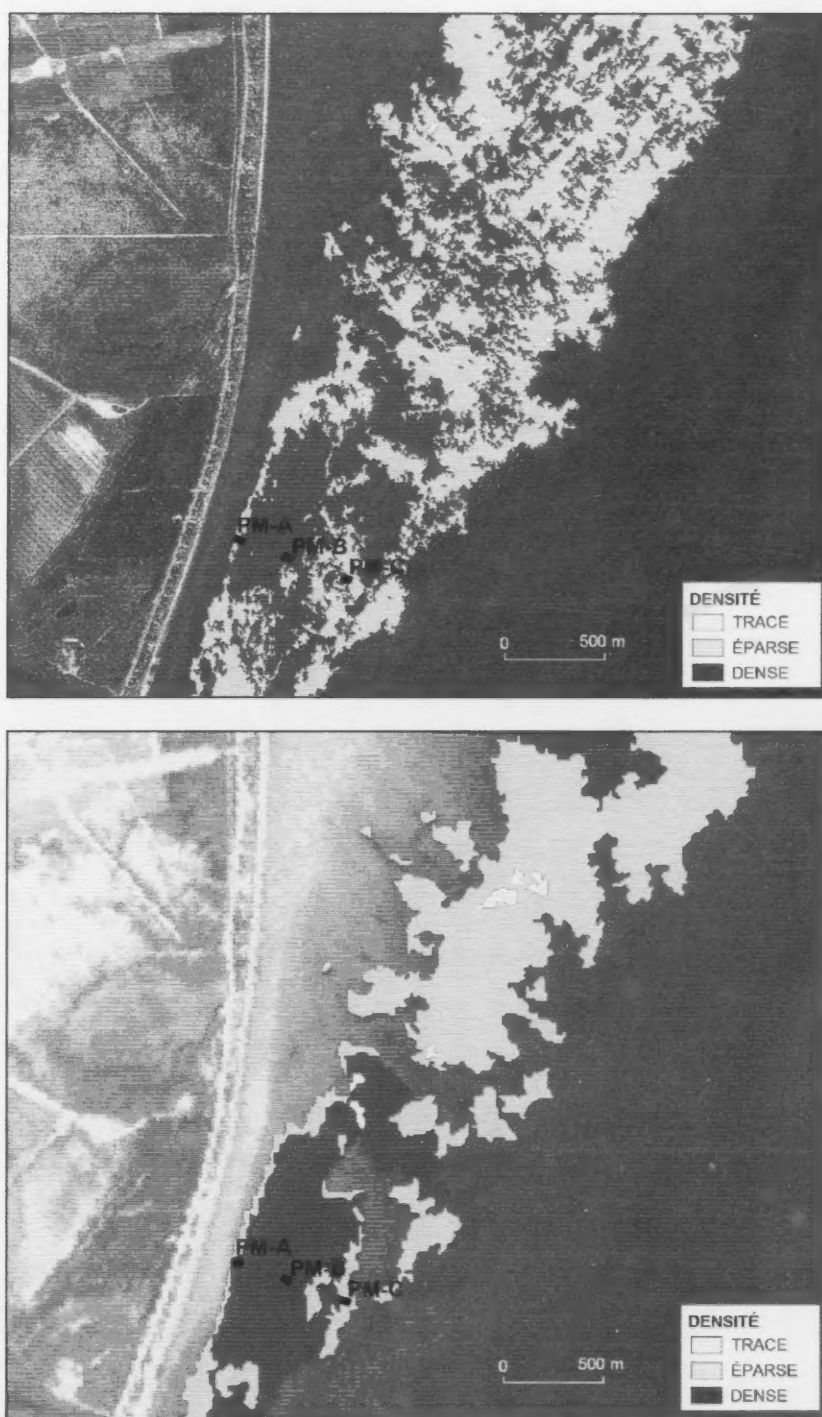


Figure 4. Carte de la densité de la zostère marine pour le secteur de la pointe Manicouagan (PM) produite à partir des images IKONOS (A) et ASTER (B). PM-A, PM-B et PM-C correspondent aux sites échantillonnés en 2005.

4.3 VALIDATION DES CLASSES DE DENSITÉ

Les données de validation terrain collectées au cours de l'été 2005 sur les 9 sites répartis dans les trois secteurs (PAO, BSL, PM) ont été compilées et reportées sur les classifications des images IKONOS 2004 et ASTER 2002 (Figures 2, 3 et 4). Le pourcentage de recouvrement des 96 quadrats d'inventaire de 4 m x 4 m ont d'abord été regroupés selon les classes suivantes: (1) trace (0 et <10%) (2) zostères éparées ($\geq 10\%$ et $\leq 50\%$) et (3) zostères denses ($> 50\%$). En reportant les résultats terrain sur la classification des deux images, la différenciation entre les classes 'trace' et 'zostères éparées' s'est avérée nulle (0%) avec ASTER et faible avec IKONOS (12%). Aussi, ces deux classes ont donc été regroupées en une seule qualifiée 'zostères éparées' réduisant à deux le nombre de classes (1) zostères éparées et (2) zostères denses pour la validation de la classification. La précision des cartes pour ces deux classes est présentée aux tableaux 3 et 4. La précision globale atteint 80,2% pour la cartographie produite avec les données IKONOS et 71,9% pour celle produite à partir des données ASTER. La précision moyenne pour les sites situés au centre de l'herbier (PAO-B, BSL-B et PM-B) où la zostère est dense et continue est de 87% pour les deux images. (Tableaux 3 et 4 et figures 2, 3 et 4). Cette précision est moindre en bordure de l'herbier (en moyenne 77% pour IKONOS et 64% pour ASTER) où certains quadrats classés denses sur le terrain sont classés éparés sur l'image et vice versa.

Tableau 3. Précision globale de la classification de la densité de la zostère marine produite à l'aide des images IKONOS. Pour chaque secteur: A=site en bordure côté terre, B=site au centre, C=site en bordure côté mer.

| IKONOS | | | | | |
|---------------------|---|-------|--|-------|-------------|
| SITE | Nombre de quadrats bien classés en zostères éparées | % | Nombre de quadrats bien classés en zostères denses | % | % global |
| PM | | | | | 87.1 |
| A | 6 / 10 | 60.0 | 83 / 86 | 92.7 | 96.9 |
| B | 0 / 6 | 0.0 | 90 / 90 | 100.0 | 93.8 |
| C | 53 / 68 | 80.0 | 15 / 28 | 50.0 | 70.8 |
| BSL | | | | | 79.9 |
| A | 40 / 52 | 76.9 | 23 / 44 | 60.0 | 65.6 |
| B | 0 / 1 | 0.0 | 95 / 95 | 100.0 | 99.0 |
| C | 49 / 71 | 70.0 | 23 / 25 | 90.0 | 75.0 |
| PAO | | | | | 73.6 |
| A | 69 / 69 | 100.0 | 0 / 27 | 0.0 | 71.9 |
| B | 0 / 30 | 0.0 | 66 / 66 | 100.0 | 68.8 |
| C | 77 / 77 | 100.0 | 0 / 19 | 80.0 | 80.2 |
| Précision globale : | | | | | 80.2 |

Tableau 4. Précision globale de la classification de la densité de la zostère marine produite à l'aide de l'image Aster.

| ASTER | | | | | |
|------------|---|-------|--|-------|-------------|
| SITE | Nombre de quadrats bien classés en zostères éparses | % | Nombre de quadrats bien classés en zostères denses | % | % global |
| PM | | | | | 84.4 |
| A | 0 / 10 | 0.0 | 85 / 86 | 98.8 | 88.5 |
| B | 0 / 6 | 0.0 | 90 / 90 | 100.0 | 93.8 |
| C | 68 / 68 | 100.0 | 0 / 28 | 0.0 | 70.8 |
| BSL | | | | | 63.9 |
| A | 41 / 52 | 78.9 | 24 / 44 | 54.6 | 66.7 |
| B | 0 / 1 | 0.0 | 95 / 95 | 100.0 | 99.0 |
| C | 0 / 71 | 0.0 | 25 / 25 | 100.0 | 26.0 |
| PAO | | | | | 67.0 |
| A | 69 / 69 | 78.3 | 0 / 27 | 0.0 | 71.9 |
| B | 0 / 30 | 0.0 | 66 / 66 | 100.0 | 68.7 |
| C | 59 / 77 | 76.6 | 2 / 19 | 5.2 | 60.5 |
| | | | Précision globale : | | 71.9 |

5. DISCUSSION

La cartographie de l'herbier de zostère marine s'est avérée très précise pour IKONOS et pour ASTER si l'on considère les résultats obtenus en comparant la classification avec les données de validation terrain qui sont de l'ordre de 95,6% et 90,6% respectivement. La précision obtenue est comparable ou dépasse les résultats d'autres études pour des images Spot-XS de résolution intermédiaire entre IKONOS et ASTER, soit 10m/10m (Lausch et Herzog, 2002; Pasquali et coll., 2005)

La superficie de l'herbier évaluée sur l'image IKONOS 2004 est 15% plus élevée que celle évaluée sur l'image ASTER 2002. L'image IKONOS captée deux ans après celle d'ASTER pourrait témoigner d'une croissance de la zostère, d'autant plus que l'herbier de Manicouagan est en croissance depuis quelques années. Cependant, la croissance de l'herbier ne peut seule expliquer cette disparité, puisqu'il est peu probable qu'en deux ans la zostère ait connu une telle avancée. Offrant une meilleure résolution, les images IKONOS captent des îlots de zostères non perçues sur les images ASTER, ce qui peut contribuer à l'obtention d'une superficie totale plus grande avec IKONOS.

Un maximum de deux classes de densité (éparse et dense) peut être extrait des deux images avec un pourcentage de précision acceptable (72 % pour ASTER et 80 % pour IKONOS). Plus de deux classes mènent à une généralisation de l'interprétation et une confusion entre les classes. Ces résultats concordent avec les études de Stritholt et Frost (1996) et Garono et coll. (2004) qui soutiennent que deux classes de densité de la zostère marine (dense et éparse) peuvent être extraites des images optiques ou hyperspectrales. Les pourcentages de précision de la classification sont élevés au centre de l'herbier où la zostère est dense et continue. Ils sont plus faibles sur son pourtour où la zostère est discontinue, particulièrement vers la limite inférieure de l'herbier (vers le large) où l'eau est plus profonde. Selon Dierssen et coll. (2003), la confusion spectrale est proportionnelle à la profondeur de l'eau puisque la réflectance des végétaux submergés est modifiée par la masse d'eau. Également, cette partie de l'herbier est affectée par les courants de marée et le mouvement des vagues et des glaces en hiver. Il en résulte un patron instable de répartition complexe de zostère et de barres de sable, qui complique la classification. La diminution de la précision en zone discontinue est plus importante sur les images ASTER. La résolution spatiale des données IKONOS de 4 mètres favorise la cartographie de la densité dans ce type de milieu hétérogène. Elle permet une meilleure discrimination pour les secteurs de zostères éparées et ceux où la zostère est implantée en îlots plus ou moins isolés. Les cartes produites à partir des images ASTER, de résolution moindre (15m), présentent un niveau de généralisation plus élevé; les îlots de zostères denses se fondent aux zones de zostères éparées.

6. CONCLUSION

Les résultats obtenus avec les 2 images ASTER et IKONOS démontrent l'utilité des imageries satellitaires comme outil pour déterminer la superficie et cartographier l'étendue et la densité de la zostère marine du vaste herbier de la péninsule de Manicouagan. Également, les images se sont avérées assez précises pour pouvoir les utiliser pour détecter certains changements au niveau de la superficie, de l'étendue et de la densité de la zostère au fil du temps. L'utilisation des images satellitaires est une solution efficace, rentable et demandant peu d'effort, comparativement à un suivi terrain. La vaste étendue d'observation que nous offrent ces images permet de détecter les patrons des herbiers et leur tendance (régression ou progression) qui ne seraient pas visibles à plus fine échelle.

Le choix du type d'images dépendra du niveau de précision requis. Puisque le niveau de détail varie entre les images, on doit définir l'échelle de représentation des cartes à laquelle s'associe un niveau de détail comme la taille minimale des polygones. Ainsi, on peut prétendre qu'une image IKONOS pourrait être utilisée si l'on cherche à obtenir une définition de l'ordre du 1:7 500 lors de l'interprétation de l'image. De même, des exigences cartographiques du 1:20 000 pourraient convenir pour l'image ASTER.

Le choix du type d'images sera également influencé par le coût associé à l'achat des images. Le coût des images IKONOS, couvrant une plus petite superficie (11 km comparativement à 60 km pour ASTER), est significativement plus élevé quand il s'agit de cartographier un herbier de grande superficie. Quoique les images IKONOS soient de plus grande résolution, celles d'ASTER peuvent offrir une précision acceptable, à coût moindre. De plus, pour des herbiers denses et continus, cette précision serait similaire à celle obtenue avec IKONOS. Cependant, comme le satellite ASTER n'est pas voué à une utilisation commerciale, le satellite SPOT-5 avec sa résolution spatiale de 10 m en mode multispectral pourrait s'avérer un bon choix pour une campagne de cartographie de la zostère à plus grande échelle (Pasqualini et coll. 2005).

On peut penser que les images satellitaires pourraient être utilisées pour la cartographie et le suivi d'autres herbiers de la zostère marine du Saint-Laurent, du moins si ces herbiers sont mono spécifiques, peu profonds, sur fonds sablonneux et baignés par une eau claire, comme celui de Manicouagan. Certaines considérations sont importantes à tenir en compte pour l'utilisation des données d'observation de la terre, par exemple, utiliser les images captées par le même satellite d'année en année et choisir les images captées aux marées basses et à la même période de l'année, soit au moment où la zostère est à son maximum de croissance (Klema 2001).

7. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'équipe du Système de gestion de l'habitat du poisson (SIGHAP) de l'Institut Maurice-Lamontagne, tout particulièrement Gilles Fortin et Brigitte Lévesque, qui ont contribué à la réalisation de plusieurs cartes aidant à la compréhension des données. Merci, également, à Claude Nozères et François Roy pour leur contribution à certaines cartes du document. Plusieurs personnes ont contribué à l'échantillonnage sur le terrain, mais merci particulièrement à François Roy, Cindy Grant et Élane Albert. Grands mercis à Patrick Dupont et Susanne Mark pour la révision de ce rapport, ainsi qu'à Jean-François St-Pierre pour son édition.

8. RÉFÉRENCES

- Andréfouët S., Zubia, M. et Payri, C. 2004. Mapping and biomass estimation of the invasive brown algae *Turbinaria ornata* (Turner) J. Agardh and *Sargassum mangarevense* (Grunow) Setchell on heterogeneous Tahitian coral reefs using 4-meters IKONOS satellite data. *Coral reefs*, Vol. 23: 26-38.
- Dekker, A.G., Brando, V.E. et Anstee, J.M. 2005. Retrospective seagrass change detection in a shallow coastal tidal Australian lake. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 97, Issue 4: 415-433.
- Fornes, A., Basterretxea, G., Orfila, A., Jordi, A., Alvarez, A. et Tintore, J. 2006. Mapping *Posidonia oceanica* from IKONOS, ISPRS. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 60: 315-322.
- Dierssen, H.M., Zimmerman, R.C., Leathers, R.A., Downes, T.V. et Davis, C.O. 2003. Ocean color remote sensing of seagrass and bathymetry in the Bahamas Banks by high-resolution airborne imagery. *Limnology and Oceanography*, Vol. 48, (1, part 2): 444-455.
- Duarte, C.M. et Chiscano, C.L. 1999. Seagrass biomass and production: a reassessment. *Aquatic Botany*, 65: 159-174.
- Garano, R.J., Simenstad, C.A., Robinson, R. et Ripley, H. 2004. Using high spatial resolution hyperspectral imagery to map intertidal habitat structure in Hood Canal, Washington, U.S.A. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 30, No. 1: 54-63.
- Grant, C. et Provencher, L. 2007. Caractérisation de l'habitat et de la faune des herbiers de *Zostera marina* (L.) de la péninsule de Manicouagan (Québec). Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques, 2772: viii + 65 p.

- Gullström, M., Lundén, B., Bodin, M., Kangwe, J., Öhman, C., Mtolera, M.S.P. et Björk, M. 2006. Assessment of changes in the seagrass-dominated submerged vegetation of tropical Chwaka Bay (Zanzibar) using satellite remote sensing. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 67, Issue 3: 399-408.
- Hemminga, M.A. et Duarte, C.M. 2000. *Seagrass ecology*. Cambridge University Press. U.K. 298 p.
- Hily, C. et Bouteille, M. 1999. Modifications of the specific diversity and feeding guilds in an intertidal sediment colonized by an eelgrass meadow (*Zostera marina*) (Brittany, France). *C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la vie*, 322: 1121-1131.
- Klemas, V. 2001. Remote Sensing of Landscape-Level coastal environment indicators. *Environmental Management*, Vol. 27: 47-57.
- Lausch, A. et Herzog, F. 2002. Applicability of landscape metrics for the monitoring of landscape change: issues of scale, resolution and interpretability. *Ecological Indicators*, Vol. 2: 3-15.
- Lundén, B. et Gullström, M. 2003. Satellite remote sensing for monitoring of vanishing seagrass in Swedish coastal waters. *Norwegian Journal of Geography*, Vol. 57: 121-124.
- Orth, R.J., Carruthers, T.J.B., Dennison, W.C., Duarte, C.M. et autres. 2006. A global crisis for seagrass ecosystems. *Bioscience*, 56: 987-996.
- Pasquali, V., Pergent-Martini, C., Pergent, G., Agreil, M., Skoufas, G., Sourbes, L. et Tsirika, A. 2005. Use of SPOT 5 for mapping seagrasses: An application to *Posidonia oceanica*. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 94, Issue 1: 39-45.
- Schweizer, D., Armstrong, R.A. et Posada, J. 2005. Remote sensing characterization of benthic habitats and submerged vegetation biomass in Los Roques Archipelago National Park, Venezuela. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 26 (12): 2657-2667.
- Stritholt, J. et Frost, P.A. 1996. Determining abundance and distribution of Eelgrass (*Zostera* spp.) in Tillamook Bay Estuary, Oregon using multispectral airborne imagery. *Earth Design Consultants inc.* 10 p.
- Wallace, J., Behn, G. et Furby, S. 2006. Vegetation condition assessment and monitoring from sequences of satellite imagery. *Ecological management & restoration*, Vol. 7, June 2006: 31-36.